

УДК 621.311

ОПТИМИЗАЦИЯ КРАТКОСРОЧНЫХ РЕЖИМОВ ВАХШСКОГО КАСКАДА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Ш.М. Султонзода, М.Ш. Раджабов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В статье рассмотрена задача краткосрочной оптимизации режимов работы гидроэлектростанций Вахшского каскада. Разработана математическая модель, учитывающая эксплуатационные, гидравлические и энергетические ограничения, а также особенности регулирования стока водохранилищ. Модель реализует целевую функцию максимизации выработки электроэнергии с учётом баланса воды и ограничений по уровням бьефов, расходам и мощности.

Ключевые слова: каскад гидроэлектростанций, краткосрочная оптимизация, режим работы, математическая модель.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВАХШСКОГО КАСКАДА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Ш.М. Султонзода, М.Ш. Раджабов

Дар мақола масъалаи оптимизатсияи кӯтоҳмуддати реҷаҳои кории силсилаи нерӯгоҳҳои барқи обии Вахш баррасӣ шудааст. Моделҳои математикӣ таҳия карда шудааст, ки маҳдудиятҳои корӣ, гидравликӣ ва энергетикӣ, инчунин хусусиятҳои танзими ҷараёни обанборҳо ба назар мегирад. Модел аз функсияи ҳадафӣ максимуми истеҳсоли энергияи электрикӣ бо риояи таъвозуни об ва маҳдудиятҳои сатҳи болообу поёноб, сарфи об ва тавонӣ нигаронида шудааст, ибораат аст.

Калимаҳои кали: силсилаи нерӯгоҳҳои барқи обӣ, оптимизатсияи кӯтоҳмуддат, реҷаи корӣ, модели математикӣ.

OPTIMIZATION OF SHORT-TERM MODES OF THE VAKHSH CASCADE OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS

Sh.M. Sultonzoda, M.Sh. Rajabov

This paper addresses the problem of short-term optimization of operating modes of the Vakhsh cascade hydropower plants. A mathematical model has been developed that incorporates operational, hydraulic, and energy constraints, as well as the specific features of reservoir flow regulation. The model implements an objective function aimed at maximizing electricity generation while accounting for water balance and constraints related to forebay and tailwater levels, discharges, and power output.

Keywords: cascade of hydropower plants, short-term optimization, operating mode, mathematical model.

Введение

Гидроэнергетика является одним из самых чистых источников энергии на нашей планете. На сегодняшний день она является основным видом возобновляемых источников энергии. Из 30% электроэнергии в мире вырабатываемой возобновляемыми источниками энергии на долю гидроэлектростанций (ГЭС) приходится 15%. По данным международной ассоциации Гидроэнергетиков (International Hydropower Association) [1] в 2024 году установленная мощность гидроэнергетики в мире составляет около 1443 ГВт, а выработка электроэнергии за счет этих станций составляет 4578 ГВт*ч.

Основные гидроэнергетические мощности Республики Таджикистан сосредоточены преимущественно на реках Вахш, Сырдарья и Варзоб. На реке Вахш в настоящее время функционирует восемь ГЭС [2], среди которых выделяется Рогунская ГЭС – самая мощная в Центральной Азии. С учётом высокой степени каскадности гидроузлов и их взаимосвязанного режима работы, ключевое значение приобретает задача разработки и внедрения методов оптимального управления эксплуатационными режимами отдельных станций и каскада в целом. Эффективное перераспределение водных ресурсов между ГЭС каскада обеспечивает увеличение суммарной выработки электроэнергии и рациональное использование гидроэнергетического потенциала [3]. Оптимизация режимов ГЭС классифицируется по временным интервалам на долгосрочную (от одного месяца до нескольких лет), среднесрочную (от нескольких дней до месяца) и краткосрочную (от одного часа до нескольких суток) [4]. В задаче краткосрочной оптимизации каскада ГЭС определяется почасовое распределение выработки с учётом комплекса эксплуатационных ограничений, включая предельные значения мощности агрегатов, уровни верхнего и нижнего бьефов, допустимые расходы воды, а также гидравлические и энергетические ограничения. Учет этих факторов позволяет не только обеспечить выполнение эксплуатационных требований, но и провести оценку эффективности использования гидроэнергетических ресурсов [5]. В современных условиях особую актуальность приобретает применение усовершенствованных методов математического моделирования и алгоритмов оптимизации, позволяющих учитывать взаимосвязь гидрологических и электрических режимов. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность комплексного управления как отдельными ГЭС, так и каскадом в целом.

Эффективное управление режимами работы гидроэлектростанций требует обязательного учета комплекса эксплуатационных, технических, гидрологических и экологических ограничений как на долгосрочном, так и на краткосрочном горизонтах планирования [6]. С учетом высокой размерности и сложности этих ограничений, задача становится крайне трудоёмкой и требует применения автоматизированных расчетных и оптимизационных систем. Вероятностный характер приточности воды к створу гидроузлов обуславливает необходимость выполнения серии сценарных водно-энергетических расчетов для оценки допустимых режимов.

Оптимизация режимов ГЭС, работающих в каскаде, зависит от наличия водохранилища и её характеристик (параметров). В настоящем исследовании рассматривается задача краткосрочной оптимизации режимов работы ГЭС Вахшского каскада. Данный каскад объединяет восемь действующих гидроэлектростанций, а также объекты, находящиеся на стадии строительства. Из них шесть расположены непосредственно на реке Вахш: Рогунская, Нурекская, Байпазинская, Сангтудинская-1, Сангтудинская-2 и Головная. Компонировка и взаимное расположение гидроузлов каскада представлены на рисунке 1, что позволяет отразить их гидравлическую взаимосвязь и степень каскадности.

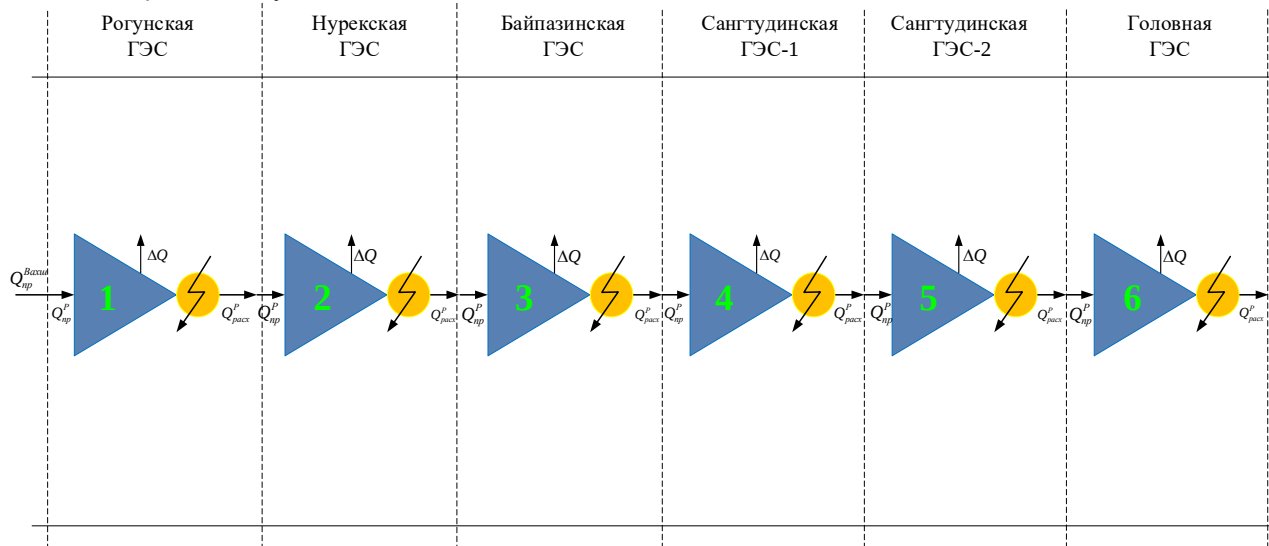


Рисунок 1 – Схема ГЭС каскада реки Вахш

Выделяют следующие основные виды регулирования речного стока, осуществляемого водохранилищами ГЭС: многолетнее, годовичное, сезонное, недельное, суточное и без регулирования (по водотoku) [7].

В таблице 1 приведены основные параметры водохранилищ ГЭС Вахшского каскада.

Таблица 1 – Параметры водохранилищ ГЭС каскада реки Вахш

Гидростанция	НПУ, м.н.у.м.	УМО, м.н.у.м.	Объём водохранилища, км ³			Вид регулирования	Напор, м
			полный	мертвый	полезный		
Рогунская	1290,0	1185,0	13,30	3,00	10,30	Многолетнее	245*
Нурекская	977,0	857,0	10,50	6,00	4,50	Годовое	223
Байпазинская	630,0	617,0	0,13	0,04	0,09	суточное	54
Сангтудинская 1	571,5	569,6	0,02	0,01	0,01	суточное	58
Сангтудинская 2	508,5	507,8	0,08	0,07	0,01	суточное	21
Головная	485,0	482,0	0,10	0,08	0,02	суточное	23,3

*Проектные данные строящейся Рогунской ГЭС.

Математическая модель каскада ГЭС на реке Вахш

Целевая функция, критерий оптимизации – Максимальная выработка электроэнергии.

$$F = \max W = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T P_{i,t} \cdot \Delta t \quad (1)$$

где: W - суммарная выработка энергии (кВт*ч); $i=1, \dots, n$ - индекс ГЭС; $t=1, \dots, T$ - интервалы времени; $P_{i,t}$ - мощность (кВт) станции i в интервале Δt - длительность интервала (ч).

Суммарная энергия каскада состоящая из n равна сумме энергий каждой ГЭС:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{t=1}^T P_{i,t} \Delta t \quad (2)$$

Мощность каждой станции

$$P_{i,t} = \rho g \eta_i Q_{i,t} H_{i,t} = 9.81 \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot \eta_i \quad (3)$$

ρ -плотность воды (≈ 1000 кг/м³), g -ускорение свободного падения (9.81 м/с²), η_i -коэффициент полезного действия агрегата, $Q_{i,t}$ - расход воды (м³/с), $H_{i,t}$ - напор (м).

Напор H для ГЭС с водохранилищем изменяется во времени.

$$H_{i,t} = Z_{i,t}^{BB} - Z_{i,t}^{HB} \quad (4)$$

Z_i^{BB} – уровень верхнего бьефа i -ой ГЭС; Z_i^{HB} - уровень нижнего бьефа i -ой ГЭС.

Уровень нижнего бьефа на ГЭС варьируется в зависимости от расхода воды. Она характеризуется кривой нижнего бьефа, то есть зависимостью $Z^{HB} = f(Q)$, которая используется при оптимизации режимов работы каскада, чтобы учесть изменение реального напора и, соответственно, выработки электроэнергии. Она обязательна для точных водно-энергетических расчётов и планирования режимов работы ГЭС. Каждая ГЭС имеет кривую нижнего бьефа, например для Нурекской ГЭС она представлена на рисунке 2.

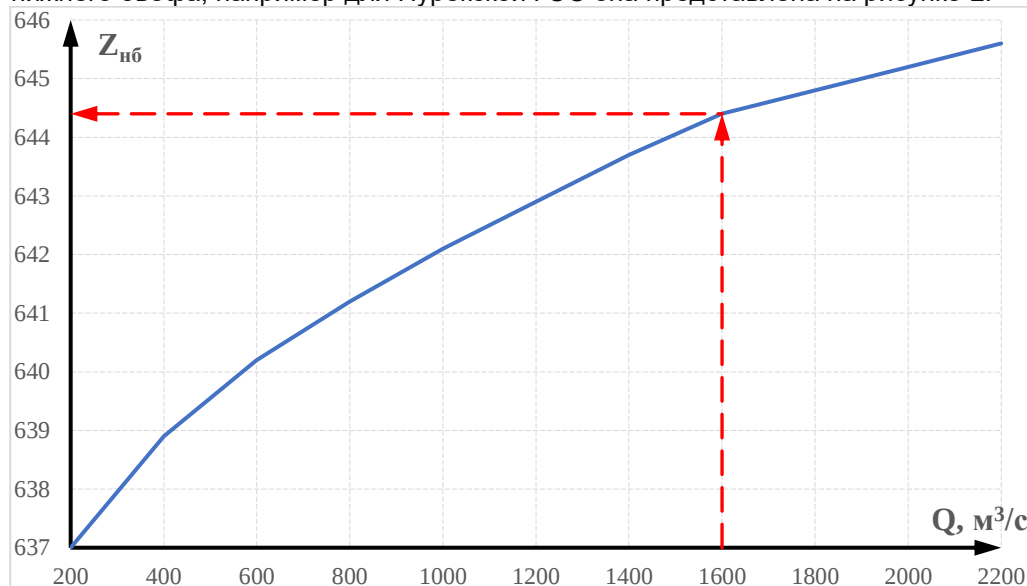


Рисунок 2 – Кривая уровня нижнего бьефа Нурекской ГЭС от расхода

При увеличении расхода турбин мощность растёт не пропорционально, так как одновременно возрастает уровень нижнего бьефа, снижая напор. Это отражается в экономических расчётах и оптимизации режима.

Коэффициент полезного действия гидроагрегата η_i или $\eta_{ГА}$, зависимость от КПД турбины и КПД генератора:

$$\eta_{ГА} = \eta_{тур} \cdot \eta_{ген} \quad (5)$$

По уровням водохранилища

Для каждой ГЭС задается максимальное и минимальное значение уровня верхнего бьефа.

$$Z_i^{BB,\min} \leq Z_{i,t}^{BB} \leq Z_i^{BB,\max}, \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$Z_{i,t}^{BB}$ – уровень верхнего бьефа i -ой ГЭС в момент времени t ;

Эквивалентно через объём водохранилища

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max} \quad (7)$$

$V_{i,t}$ – объём i -го водохранилища в момент времени t ;

Кривая зависимости уровня верхнего бьефа водохранилища от объёма, которая определяется на основе данных топографической съёмки местности и батиметрических измерений дна.

$$V_{i,t} = f_i^{zv}(Z_{i,t}^{ББ}) \leftrightarrow Z_{i,t}^{ББ} = f_i^{-1}(V_{i,t}) \quad (8)$$

Данная кривая имеет ключевое значение при моделировании режимов работы ГЭС, поскольку обеспечивает количественную оценку изменения объема водохранилища при варьировании верхнего бьефа водохранилища, что важно при оптимизации. Кривая зависимости уровня верхнего бьефа водохранилища Нурекской ГЭС от объёма, построенное на основе батиметрических измерений приведена на рисунке 3.

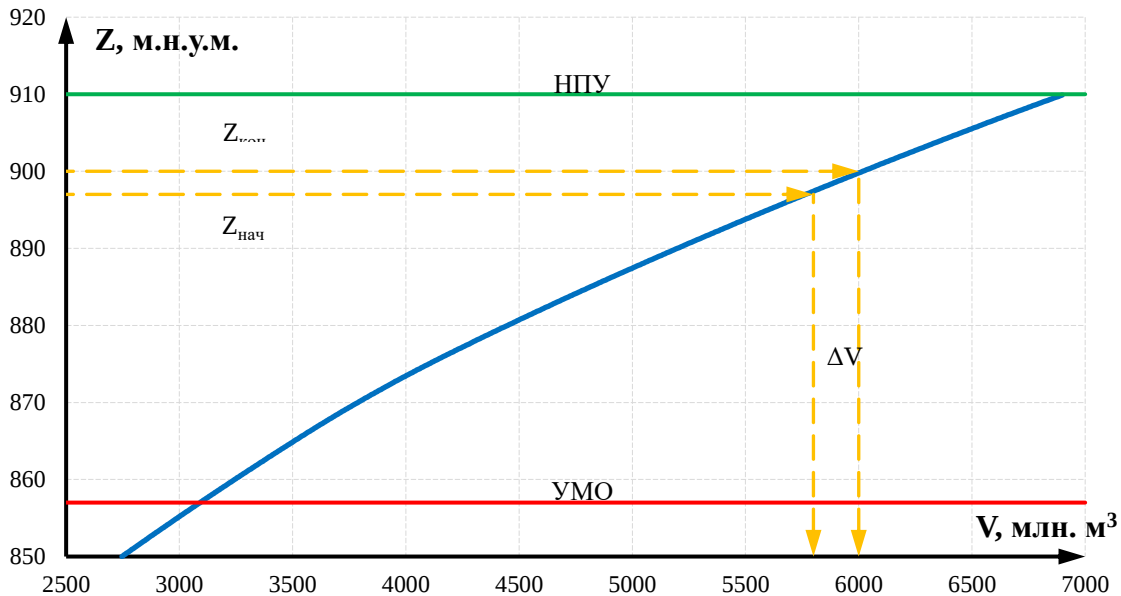


Рисунок 3 – Кривая зависимости уровня верхнего бьефа водохранилища Нурекской ГЭС от объёма

При наличии достаточно длительной гидрологической статистики эксплуатационные кривые позволяют эффективно определять режимы работы для любого внутригодового или внутримесячного периода при заданном общем притоке воды и уровне верхнего бьефа. Эти кривые могут быть использованы в имитационных моделях для различных исследований.

На характер расчетной кривой объемов $V=f(Z)$ и, следовательно, полезный объем Рогунского водохранилища влияет в основном продолжительность его эксплуатации, в течение которой происходит его заилиение.

По мощности каждой ГЭС

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (9)$$

По расходу воды для каждой ГЭС

Для каждой ГЭС каскада имеются ограничения по расходам через турбину, холостые сбросы и для всего ГЭС.

$$Q_i^{тур, \min} \leq Q_{i,t}^{тур} \leq Q_i^{тур, \max}, \quad 0 \leq Q_{i,t}^{холост.} \leq Q_i^{холост., \max}, \quad (10)$$

$$Q_{i,t}^{\min.обяз.} \leq Q_{i,t}^{ГЭС} \leq Q_{i,t}^{сумм., \max} \quad (11)$$

Уравнение баланса воды

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + 3600 \cdot (Q_{i,t}^{np} - Q_{i,t}^{ГЭС}) \Delta t \quad (12)$$

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i,t}^{мыр.} + Q_{i,t}^{холост.} \quad (13)$$

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} \pm Q_{i,t}^{водох.} + \Delta Q_{i-1,i} \quad (14)$$

где:

$Q_{i-1,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС}$ – приток воды предыдущей ГЭС;

$Q_{i,t}^{водох.}$ – расход воды с водохранилища «+»-когда водохранилище сбрасывается; «-» - когда

водохранилище заполняется;

$Q_{i,t}^{водох.} = 0$ - при работе на транзитном стоке;

$Q_{i,t}^{водох.}$ – значение расхода воды с водохранилища -той ГЭС определяется по сработанному или

накопленному объёму воды в водохранилища $\pm \Delta V_i$:

$$Q_{i,t}^{водох.} = \frac{\pm \Delta V_i}{\Delta t}; \left[\frac{м^3}{с} \right] \quad (15)$$

«+»-когда водохранилище сбрасывается $Z_{i,нач.}^{ББ} > Z_{i,кон.}^{ББ}$;

«-» - когда водохранилище заполняется $Z_{i,нач.}^{ББ} < Z_{i,кон.}^{ББ}$.

ΔV_i в зависимости от $Z_{i,нач.}^{ББ}$ и $Z_{i,кон.}^{ББ}$ определяется графическим или методом Кусочно-линейной аппроксимации по кривой зависимости уровня верхнего бьефа водохранилища от объёма $V_{i,t} = f_i^{zv}(Z_{i,t}^{ББ})$ (рис. 3).

$\Delta Q_{i-1,i}$ – водозаборы, боковые притоки и др. водохранилища -той и $i - 1$; ГЭС.

$$\Delta Q_{i-1,i} = Q_{i,t}^{бок.пр} - Q_{i,t}^{водоз.} - \Delta Q_i^{испар.} - \Delta Q_i^{фил.} + Q_i^{осад.} - \Delta Q_i^{лед.} \quad (16)$$

здесь,

$Q_{i,t}^{бок.пр}$ – боковые притоки воды в водохранилище i-той ГЭС;

$Q_{i,t}^{водоз.}$ – расход на водозабор (орошение);

$\Delta Q_i^{испар.}$ – потери воды из водохранилища на испарение;

$\Delta Q_i^{филт.}$ – фильтрационные потери;

$Q_i^{осадки}$ – поступления от осадков;

$\Delta Q_i^{лед.}$ – потери на льдообразование.

Ограничение по скорости изменения (интенсивности) уровня верхнего бьефа

$$\left| Z_{i,t+1}^{ББ} - Z_{i,t}^{ББ} \right| \leq \Delta Z^{ББ \max} \quad (17)$$

Режимы ГЭС каскада на реке Вахш

Каждая (i-й) ГЭС, работающая в каскаде реки Вахш работает в следующем режимах. В зависимости от притока воды в водохранилища могут работать в трех режимах.

1. Режим сработки водохранилища – когда дополнительно к притоку воды в водохранилища из водохранилища расходуется вода $Q_{i,t}^{водох.}$, то есть идет сработка водохранилища $Z_{i,нач.}^{BB} > Z_{i,кон.}^{BB}$, в этом случае формула (14) будет иметь вид:

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} + Q_{i,t}^{водох.} + \Delta Q_{i-1,i}$$

2. Режим заполнения водохранилища – когда часть притока воды идет на заполнение водохранилища, $Z_{i,нач.}^{BB} < Z_{i,кон.}^{BB}$, при этом (14):

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} - Q_{i,t}^{водох.} + \Delta Q_{i-1,i}$$

3. Транзитный режим – когда расход воды из водохранилища приравнивается к притоку воды в водохранилище. В том режиме уровень верхнего бьефа остается постоянным, $Z_{i,нач.}^{BB} = Z_{i,кон.}^{BB}$. Этот режим имеет наибольший эффект, когда уровень верхнего бьефа равно НПУ, так как при этом ГЭС имеет максимальный напор, и соответственно получает максимальную мощность.

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} + \Delta Q_{i-1,i}$$

Графически возможные режимы водохранилищ каждой ГЭС имеет вид, как показана на рисунке 4.

Каскад ГЭС расположенные на реке Вахш (рис. 1) при оптимизации по предложенной математической модели и режимов водохранилищ (рис. 4) будут работать в следующих возможных режимах: Допустим ГЭС 1 на рисунке 5 – Рогунская ГЭС, будет работать по заданному по графику сработки и заполнения водохранилища, то есть, по разработанному диспетчерскому графику и расходует количество воды равным $Q_{1,t}^{ГЭС} = Q_{1,t}^{рас.}$.

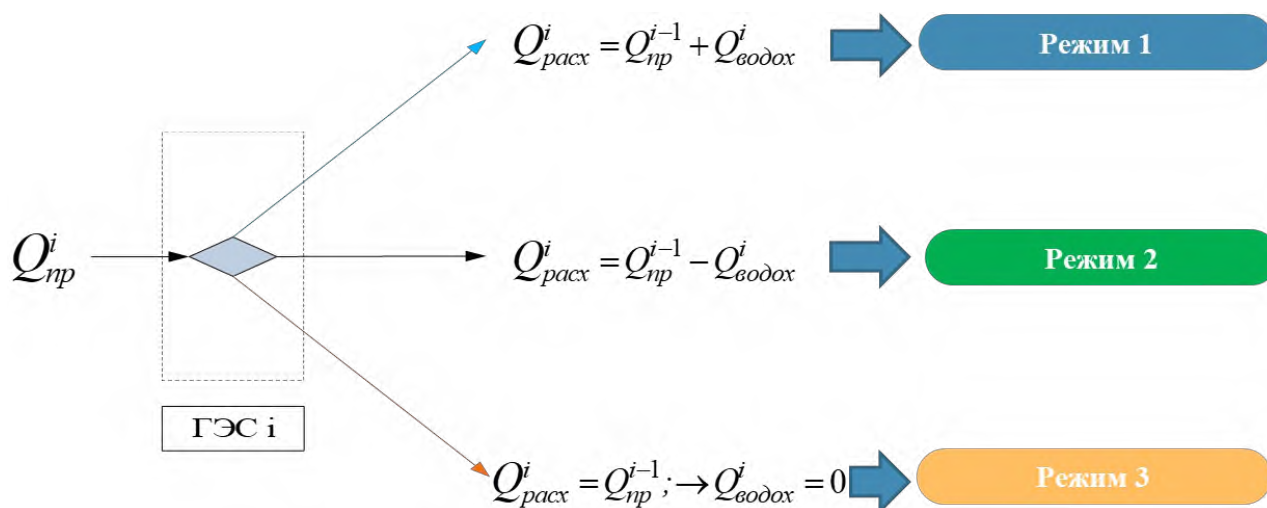


Рисунок 4 – Возможные режимы водохранилищ ГЭС

Этот расход воды с учётом водозаборов и других расходов воды $\Delta Q_{i-1,i}$, попадает в водохранилище ГЭС 2 – Нурекской ГЭС. На Нурекской ГЭС, водохранилище имеет годовое регулирование стока, и она может работать в возможных трех режимах, которые приведены на рисунке 4, то есть водохранилище ГЭС-2 может дополнительно к притоку сработать собственное водохранилища, заполнять ее используя часть притока или же расходовать объём воды равное к притоку – работать в транзитном режиме. При этом должны соблюдаться все условия приведенные (6 – 17).

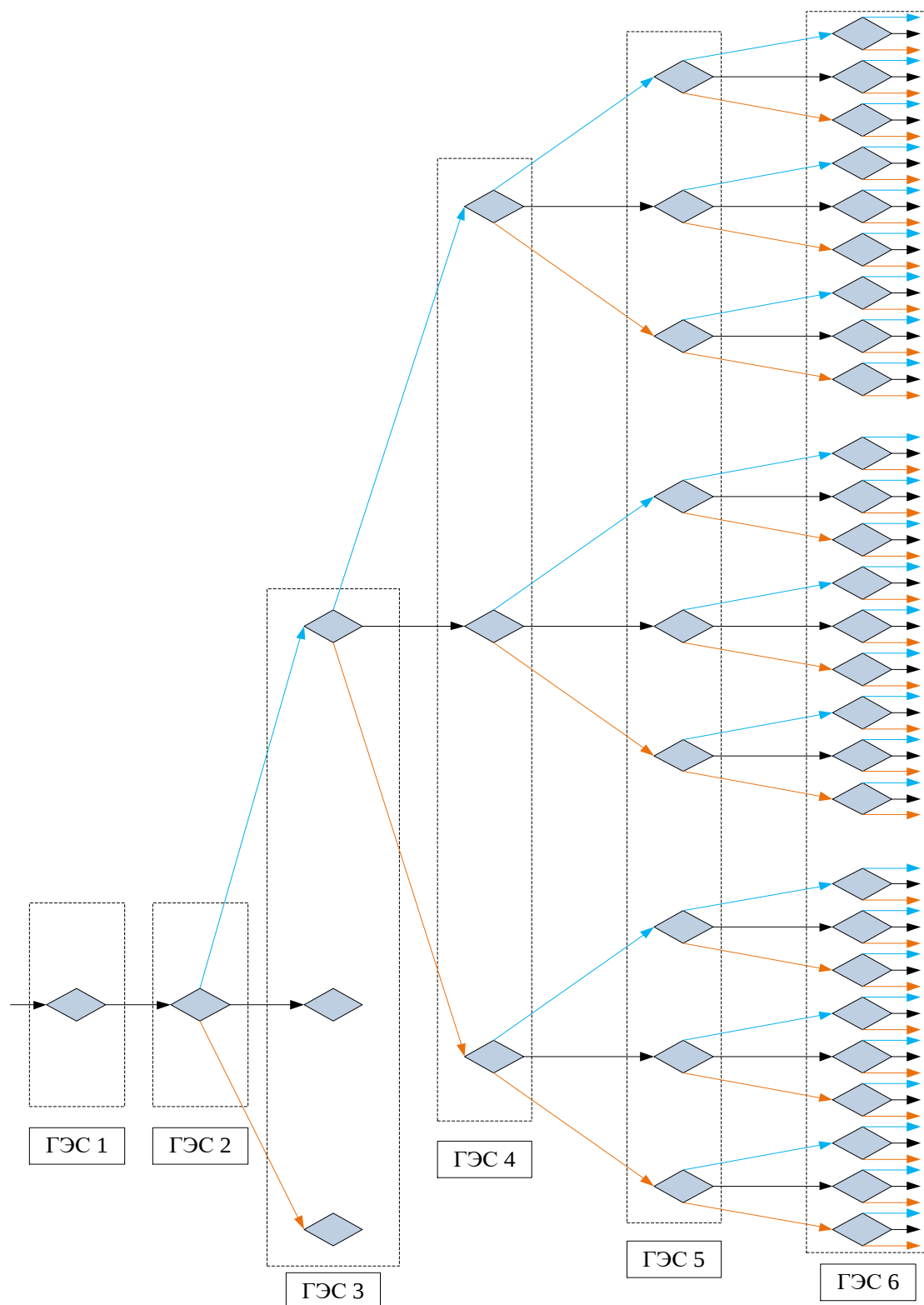


Рисунок 5 - Модель режимов ГЭС каскада реки Вахш

Далее по каскаду расход воды из ГЭС -2 попадает в водохранилище ГЭС 3 – Байпазинской ГЭС. Каждому из возможных трех режимов ГЭС - 2, соответствует 3 режима ГЭС -3, то есть, трем режимам ГЭС-2 соответствует 9 режима ГЭС 3. Далее аналогично расходы воды поступают на ГЭС 4 – Сангтудинскую-1, ГЭС 5 – Сангтудинскую-2 и ГЭС 6 – Головную ГЭС, и каждая из них может работать в трех возможных режимах.

Таким образом, при расходе воды $Q_{1,t}^{ГЭС} = Q_{1,t}^{рас.}$ из ГЭС-1, ГЭС-2 может работать в 3 режимах, ГЭС-3 в 9 режимах в зависимости от режима ГЭС-2, ГЭС-4 в 27 режимах, ГЭС-5 в 81 режиме и ГЭС-6 может работать в 243 режимах (рис. 5). В каждом режиме каждой ГЭС каскада должны соблюдаться все условия и ограничения приведенные (6 – 17).

Использование предложенной модели позволяет оптимально перераспределять сток между водохранилищами в краткосрочном горизонте. Тем самым достигается максимизация суммарной выработки при соблюдении гидравлических, технических и эксплуатационных ограничений, а также повышается эффективность и надёжность функционирования ГЭС всего каскада.

Заключение

На основе разработанной математической модели и алгоритмического обеспечения реализован программный комплекс для ЭВМ [8], предназначенный для оптимального краткосрочного управления режимами работы каскада гидроэлектростанций на реке Вахш. В основе расчётов лежит метод линейной оптимизации, позволяющий эффективно учитывать технологические ограничения по уровням, расходам и мощности для каждой станции каскада.

Разработанная математическая модель, обеспечивает определение оптимальных режимов работы ГЭС каскада Вахш в краткосрочном горизонте планирования. Оптимизация осуществляется по критерию максимизации выработки электроэнергии при строгом учёте гидравлических, технических и электрических ограничений. Реализация данного подхода позволяет эффективно использовать водные ресурсы, повышать экономичность работы каскада и обеспечивать надёжность функционирования энергосистемы.

Рецензент: Таниев З.С. – к.т.н., доцент кафедры «Электрэнергетика» филиала ИГУ «МЭИ» в г. Душанбе

Заключение

1. International Hydropower Association (IHA). 2025 World Hydropower Outlook. <https://www.hydropower.org/>. 2025.
2. М.Ш. Раджабов, Х.И. Усмонов, Ш.М. Султонов У.У. Қосимов. Анализ режимов работы водохранилищ гидроэлектростанций работающих в каскаде // Политехнический вестник. Серия: Серия Инженерные исследования. 2022. Vol. 60. No. №4. pp. 52-58.
3. Цветков Е.В., Алабышева Т.М., Парфенов Л.Г. Оптимальные режимы электростанций в энергетических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 304 С.
4. Shang, L.; Li, X.; Shi, H.; Kong, F.; Wang, Y.; Shang, Y. Long-, Medium-, and Short-Term Nested Optimized-Scheduling Model for Cascade Hydropower Plants: Development and Practical Application. Water 2022, 14, 1586. <https://doi.org/10.3390/w14101586>
5. Гидроэнергетика: учебное пособие / Т.А. Филиппова, М.Ш. Мисриханов, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. - 2-е изд., перераб. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. -620 с.
6. Гидроэнергетика / учебник для вузов // А.Ю. Александровский, М.И. Кнеллер, Д.Н. Коробова и др. ; Под ред. В.И. Обрезкова. - 2-е изд. перераб и доп. -М.: Энергоатомиздат, 1988.- 512с.
7. А.Г. Русина, Т.А. Филиппова и др. ГЭС: искусство управления : монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. 226.
8. СВИДЕТЕЛЬСТВО. RU2025618934. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Государственная регистрация программы для ЭВМ: Оптимизация режимов работы гидроэлектростанций Вахшского каскада // In: Султонов Ш.М., Бобоев Ш.А., Раджабов М.Ш., Худжасаидов Дж.Х., Гуломзода А.Х. // Номер регистрации (свидетельства): № 2025618934, Дата регистрации: 10.04.2025,.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Рачабов Мирзошариф Шарифович	Раджабов Мирзошариф Шарифович	Rajabov Mirzosharif Sharifovoch
Докторант PhD	Докторант PhD	PhD
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
TJ	RU	EN
Султонзода (Султонов) Шерхон Муртазо	Султонзода (Султонов) Шерхон Муртазо	Sultonzoda (Sultonov) Sherkhon Murtazo
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of technical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S.Osimi
E.mail: sultonzoda.sh@mail.ru		